

# 发光二极管主波长的优化计算方法

陈焕庭, 吕毅军, 高玉琳, 王亚军

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 从发光二极管主波长的定义出发, 比较分析了计算发光二极管主波长的3种方法, 并提出了一种优化的计算方法。先将色品图划分为10个区域, 再结合线性插值运算, 可以减少运算次数、提高寻找速度, 简化了求主波长的计算过程, 同时使主波长计算结果的精确度优于0.1 nm。

**关键词:** 计量学; 发光二极管; 主波长; 算法

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2007)04-0321-04

## Optimized Algorithm for Determining Dominant Wavelength of LED

CHEN Huan-ting, LU Yi-jun, GAO Yu-lin, WANG Ya-jun

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005 China)

**Abstract:** A novel algorithm to determine the dominant wavelength of LED is proposed based on the definition of dominant wavelength and the comparisons of three conventional calculation methods. To realize this algorithm, the CIE1931-xy Chromaticity Diagram is divided into 10 different regions within the wavelength range from 380.0 nm to 780.0 nm with a resolution of 1.0 nm, then the linear interpolation is implemented to locate the dominant wavelength with a resolution as precise as 0.1 nm. This algorithm not only very facilitates the calculation speed to determine the dominant wavelength of LED, but also increases the resolution precision.

**Key words:** Metrology; LED; Dominant wavelength; Algorithm

## 1 引言

发光二极管(LED)是一种特殊的光源,无论在尺寸、光通量大小、光谱和空间强度分布方面都不同于人们通常所说的“灯”。把光度量从发光强度标准传递到LED并不是一件简单的事情,它包含着很多的不确定性。光学设计上的巨大差异、LED输出的光和辐射与芯片温度相关的特性,可使LED测量的重现性恶化。这些都引起了各国工业协会和国际照明委员会(CIE)的关注。近年来CIE分别成立了“TC2-45LED测量”和“TC2-46CIE/ISO关于LED强度测量标准”两个TC2技术委员会的专门化小组

来研究解决相应的问题<sup>[1,2]</sup>。

发光二极管既是一个半导体二极管,又是一个光源。作为半导体器件,就需要测量它的电参数。电参数是衡量一个发光二极管是否能正常工作的最基本的判据,通常包括正向电流和正向电压、反向电压和反向电流。作为一个光源,就必须测量它的光和辐射在空间分布的能量参数、光和辐射能量的光谱分布参数及在人眼中所引起的心理响应<sup>[3,4]</sup>。从而可计算出相应的一系列色度参数,如三刺激值、色坐标、主波长、兴奋程度、相关色温<sup>[5]</sup>、显色指数。其中关于主波长的计算,目前仍缺乏一种可以准确、快速的计算方法。作为与福建省半导体照明工程技术研究中心合作研究的一部分,本文主要探讨主波长

收稿日期: 2006-06-11; 修回日期: 2006-11-23

基金项目: 国家863计划“半导体照明工程”重大项目(2006AA03A175); 福建省重点科技项目(2006H0092); 厦门大学科技创新项目(XDKJCX20051011)

作者简介: 陈焕庭(1982-),男,福建漳州人,厦门大学硕士研究生,主要研究方向为LED二次光学设计。htchen23@sina.com

的优化计算方法。

在色度学中,任意样品颜色的色品除了可以用色品坐标表示外,CIE 还推荐可以用主波长和色纯度来表示。即采用对特定的非彩色刺激(即在通常的观察条件下感觉为无色的颜色刺激)的色品点  $W$  (称为参照白点)的距离和方向来表示颜色。

对于可见光,人们总是以人眼的视觉观测结果来加以评定。色度学就是以人眼特性为基础对可见光进行颜色度量的科学。只要测量得到 LED 的光谱能量分布函数  $p(\lambda)$  就可以计算它的色光的颜色三刺激值  $X, Y, Z$  和色度坐标  $x, y, z$ :

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{780} p(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda=380}^{780} p(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \int_{380}^{780} p(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda=380}^{780} p(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \int_{380}^{780} p(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda=380}^{780} p(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (1)$$

由于实际上很难用数学表达式来写出  $p(\lambda)$ , 因此常以求和来近似积分。这里  $Y$  对于光源来说, 它为光源的亮度。对于物体色而言,  $k$  称为调整系数, 它是将照明体或光源的  $Y$  值调整为 100 时得出:

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda=380}^{780} p(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

色度坐标:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \\ x+y+z=1 \end{cases} \quad (3)$$

图 1 就是根据 CIE1931-XYZ 系统绘制的 CIE1931- $xy$  色品图, 这里  $X, Y, Z$  为颜色的三刺激值。色品图是由一平面封闭舌形曲线组成, 任何颜色在色品图上都占有一个确定的位置(坐标)<sup>[6]</sup>。

任意一种颜色  $S$  的主波长是指某一种光谱色的波长, 用符号  $\lambda_d$  表示。这种光谱色按一定比例与一种确定的参照光源相加混合, 就能匹配出颜色  $S$ 。

但并不是所有的颜色都有主波长, CIE 色品图中连接白点和光谱轨迹两 endpoint (380 nm, 780 nm) 所形成的三角区域内各色品点都没有主波长, 因此就引入补色波长这个概念。一种颜色  $P$  的补色波长是指某一种光谱色的波长, 此波长的光谱色与适当比

例的颜色  $P$  相加混合, 能匹配出某一种确定的参照白光。补色波长可以用符号  $\lambda_c$  或  $-\lambda_d$  表示。如果已知样品的色品坐标  $x, y$  和特定白光的色品坐标为  $x_w, y_w$ , 一般可采用两种方法求样品的主波长。

## 2 计算主波长的方法

### 2.1 作图法<sup>[7]</sup>

图 1 为 CIE1931- $xy$  色品图, 图中弧线上的各

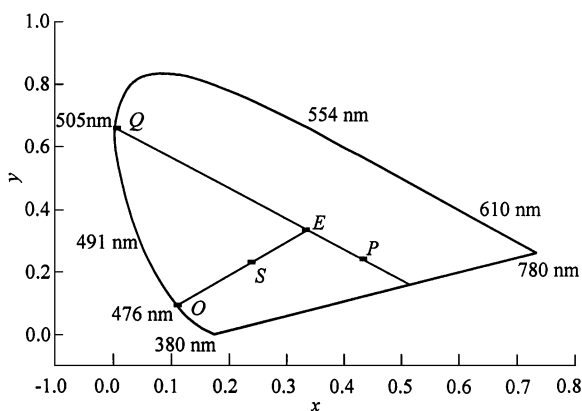


图 1 CIE1931- $xy$  色品图

点代表纯光谱色, 此弧线称为光谱轨迹。从 380 nm (紫) 到 780 nm (红) 的直线是光谱上没有的紫-红颜色系列(非光谱色)。色品图上标出样品点和白点 ( $E$  点), 由  $E$  点向样品  $S$  引一直线, 延长直线与光谱轨迹相交于  $O$  点,  $O$  点处的波长即样品  $S$  的主波长, 决定了样品  $S$  的色调。从代表非光谱色系列的直线上任一点  $P$  通过  $E$  点引一直线, 交光谱轨迹于  $Q$  点,  $Q$  点的颜色是  $P$  点非光谱色的补色。  $Q$  点对应的光谱色波长就是样品  $P$  的补色波长。

### 2.2 计算查表法

计算方法是根据色品图上连接白点与样品点的直线的斜率, 查表读出该样品的主波长。关于白点的选择, 对于非自发光体, 一般选标准发光体(如  $A, B, C, D65$ ) 为参考点, 选择不同的参考点所得到的主波长结果也不同; 对 LED 之类的自发光体, 以等能白光  $E$  点为白点。光谱色相应与 CIE 标准照明体  $A, B, C, E$  的主波长的斜率值已标准化, 可通过查表<sup>[7]</sup> 可得到。连接白点 ( $x_w, y_w$ ) 与样品点 ( $x, y$ ) 直线的斜率可用下式计算:

$$\text{斜率 } k = \frac{x - x_w}{y - y_w} \quad \text{或} \quad \frac{y - y_w}{x - x_w} \quad (4)$$

$k$  在这两个斜率中选一个较小的绝对值, 通过查表求得样品的主波长或补色波长。

2.3 用划分区域结合线性插值法计算主波长

利用计算机编程求主波长关键部分是如何精确快速地找到光谱轨迹上对应的主波长那点。常规方法是在 380 nm ~ 780 nm 这段轨迹上逐点算出它们与白点的斜率, 然后逐次与白点和样品的斜率进行比较, 找到斜率相等那点, 这点就是样品的主波长或补色波长。根据修订后的 CIE1931 光谱三刺激值得到的等能白光  $E$  点色品坐标为  $(0.333\ 314, 0.333\ 288)$ 。如果将色品图上光谱轨迹以  $0.1\ \text{nm}$  为间隔计算它们与白点的斜率后发现绝对值最大为  $1274.8(554.4\ \text{nm})$ , 因此在编程计算中不存在溢出错误的危险。因此本文计算光谱轨迹与白点的斜率时公式采用

$$k = \frac{y - y_w}{x - x_w}$$

但是采用逐点寻找的方法显然运算量过大, 因此可先将色品图划分为若干区域, 从而可缩小范围进行逐点寻找, 这样可大大提高运算速度。我们根据白点与色品图轨迹上各点之间斜率的大小, 把色品图划分为 10 个区域。分区标准依据如表 1。

表 1 色品图划分区域表

区域	判据
1	$1 \leq k < 2.0624, \quad y < 0.333\ 288$
2	$0 \leq k < 1, \quad y < 0.333\ 288$
3	$-1 \leq k < 0, \quad y > 0.333\ 288$
4	$k > -1, \quad y > 0.333\ 288$
5	$k \geq 1, \quad y > 0.333\ 288$
6	$0 \leq k < 1, \quad y > 0.333\ 288$
7	$-0.169363 < k < 0, \quad y < 0.333\ 288$
8	$-1 \leq k < -0.169363, \quad y < 0.333\ 288$
9	$k < -1, \quad y < 0.333\ 288$
10	$k \geq 2.0624, \quad y < 0.333\ 288$

表中,  $k$  代表等能白点  $E(x_w, y_w)$  与样品点  $(x, y)$  直线的斜率,  $y$  为样品点的  $y$  坐标。

如图 2 所示可先判断样品点的  $y$  坐标是否大于等能白点  $E$  的  $y$  坐标, 若大于则寻找范围可直接定位在 3、4、5、6 区域。若小于则寻找范围定位在 1、2、7、8、9、10 区域。接下来定位样品点具体是落在哪个区域, 再进行逐点查找, 便可快速找出相应的主波长或补波长点。为了提高结果的精度, 可以用  $0.1\ \text{nm}$  为间隔逐点查找, 这样可使结果的精确度达到  $0.1\ \text{nm}$  以下, 但是会造成运算时间较长。譬如在区

域 7 范围内数据量就有 1700 个点, 由于考虑到计算机内存等限制, 大数据量的逐点查找将会导致运行速度大大降低。为进一步提高计算速度, 同时也减少内存占有量, 我们把色品坐标轨迹数据以  $1\ \text{nm}$  为间隔进行分区, 可使数据量相对  $0.1\ \text{nm}$  的减小了 10 倍, 但是找到主波长或补色波长只能精确到  $1\ \text{nm}$  以下。

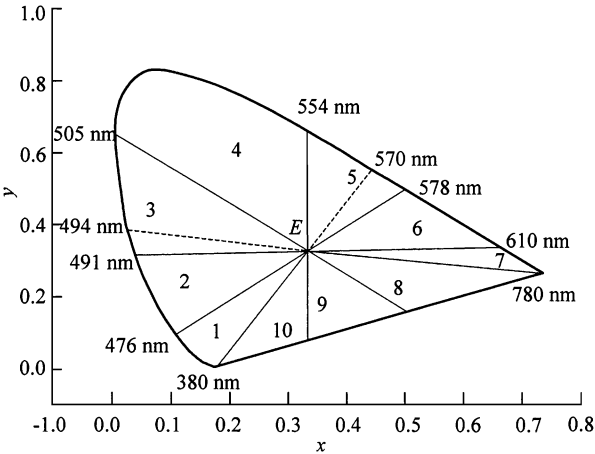


图 2 划分区域求主波长

为进一步提高精确度, 可通过线性插值运算, 同样可以使结果精确度达到  $0.1\ \text{nm}$  以下。具体方法如下: 如图 3 所示, 首先通过分区查找确定样品色品坐标落在对应主波长为  $\lambda_1, \lambda_2$  光谱轨迹与白点的两条斜率为  $k_1, k_2$  的连线之间。则样品主波长  $\lambda_0$  界于  $\lambda_1, \lambda_2$  之间, 可通过线性插值运算来确定主波长  $\lambda_0$ 。例如:

设  $(x_0, y_0)$  到过  $E(0.333\ 314, 0.333\ 288)$  点, 斜率为  $k$  的直线的距离为  $d$ :

$$d = \frac{|y_0 - 0.333\ 288 + k(0.333\ 314 - x_0)|}{(1 + k^2)^{1/2}} \tag{5}$$

分别算出  $(x_0, y_0)$  到相邻两直线的距离  $d_1, d_2$ , 根据线性内插公式:

$$\lambda_0 = \lambda_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{d_1 + d_2} d_1 \tag{6}$$

得到相应主波长  $\lambda_0$  的值。

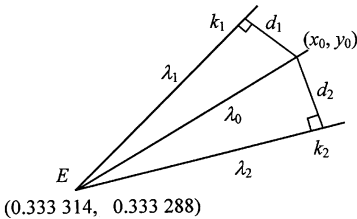


图 3 线性插值处理

(下转第 328 页)

新激发出某一波长的光等。

对于情况(1)而言,相当于对两种材料分别测试然后叠加。本文所述方法仍然有效。

对于情况(2)而言,材料 2 如果对材料 1 发射出来的光子波长选择性很高的话,就会容易导致寻峰方法失效。例如在图 7 中,假设材料 2 对材料 1 发射峰 460nm 附近的吸收特别高的话,就会导致测试得到的结果在 460 nm 处出现峰谷,附近出现两个峰值,从而导致峰值误判。

对于情况(3)而言,此时认为是一种新的荧光材料更加适合一些。这种情况下,似乎采用寻峰方法来鉴别物质本身已经不可行了。

## 6 结束语

本文提出了一种固体对比寻峰方法,并与已有的几种寻峰方法做了分析比较。结论显示,该方法准确高效,并且能适用于自校准型和非自校准型荧光光谱仪。该方法在荧光色度以及荧光绝对量子产率的测量中已经有所应用。对于单种固体荧光材料或激发发射区无重叠的混合荧光材料的鉴别,也有一定的应用价值。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 李在清. 光谱光度测量与标准[ M ]. 北京: 中国计量出版社, 1993.
- [ 2 ] Zwinkels J C, Gauthier F. Instrumentation standards and procedures use at the National Research Council of Canada for high — accuracy fluorescence measurements[ J ]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 380: 193~209.
- [ 3 ] Shakespeare T, Shakespeare J. Problems in colour measurement of fluorescent paper grades[ J ]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 380: 227~242.
- [ 4 ] Burns D M, Johnson N L. Metrology of fluorescent retro-reflective materials and its relationship to their daytime visibility [ J ]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 380: 211~226.
- [ 5 ] Gaigalas A K, *et al.* The Development of Fluorescence Intensity Standards[ J ]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2001, 106: 381~389.
- [ 6 ] Danielson T L, *et al.* Impact of filter paper on fluorescence measurements of buffered saline filtrates[ J ]. *Talanta*, 2003, 59: 601~604.
- [ 7 ] Gregor I, *et al.* Precise fluorescence measurement for determination of photophysical properties of dyes[ J ]. *Chemical Physics*, 2001, 272: 185~197.
- [ 8 ] 冯国进, 王煜. 积分球条件下一种固体荧光样品寻峰方法[ J ]. 计量技术, 2007, (2): 36~38.

(上接第 323 页)

用 Delphi 7.0 分别编制了这两种算法的计算机程序。其中采用波长间隔为 0.1 nm 的算法由于数据量过大, 过多占用内存, 直接影响到计算速度。而采用间隔为 1 nm、利用划分区域结合线性插值法计算主波长的算法, 可大大提高运算速度, 并且计算结果与采用 0.1 nm 间隔时的结果一致, 精确度仍然保持在 0.1 nm 以下。

## 3 结 论

本文提出了一种计算 LED 主波长的新优化算法。通过划分区域结合线性插值, 减少了运算次数、提高了寻找速度, 在计算速度和精度方面都达到较为理想状态, 大大简化了求主波长的计算过程, 同时使主波长计算结果的精确度优于 0.1 nm。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] CIE. Proceedings of the CIE LED Symposium 97 on Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics [ C ]. Vienna: 1997.
- [ 2 ] CIE. Standard methods for specifying and measuring LED cluster characteristics[ A ]. Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement [ C ]. Gaithersburg: 2001.
- [ 3 ] CIE127—1997, Measurement of LED[ S ].
- [ 4 ] 鲍超. 超高亮度 LED 测量问题[ J ]. 液晶与显示, 2003, 18(4): 244~50.
- [ 5 ] 代彩红, 于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论[ J ]. 计量学报, 2000, 21(3): 183~188.
- [ 6 ] 鲍超. 发光二极管测试技术和标准[ J ]. 物理学和高新技术, 2003, 32(5): 319~324.
- [ 7 ] 汤顺青. 色度学[ M ]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990, 79~80.